

TESIS CARRERA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS  
FÍSICAS

**ANÁLISIS DE EVENTOS ATÍPICOS DETECTADOS  
DURANTE TORMENTAS ELÉCTRICAS EN EL  
OBSERVATORIO PIERRE AUGER**

**Lic. Víctor Hugo Purrello**  
Maestrando

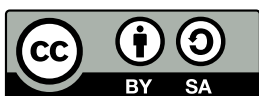
**Dr. Xavier Bertou**  
Director

**Miembros del Jurado**  
Dr. Esteban Roulet (Instituto Balseiro)  
Dr. Ingomar Allekotte (Instituto Balseiro)  
Dr. Víctor Hugo Ponce (Instituto Balseiro)

Diciembre de 2014

Partículas y Campos – Centro Atómico Bariloche

Instituto Balseiro  
Universidad Nacional de Cuyo  
Comisión Nacional de Energía Atómica  
Argentina



Esta tesis, su texto y las imágenes de elaboración propia están licenciadas bajo:  
[Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

A mi familia



# Índice de contenidos

Índice de contenidos	v
Índice de figuras	vii
Índice de símbolos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Observatorio Pierre Auger . . . . .	2
1.1.1. Detector de superficie . . . . .	2
1.1.2. Almacenamiento de datos medidos . . . . .	3
1.2. Descargas Eléctricas en Tormentas . . . . .	6
<b>2. Caracterización de Eventos Atípicos</b>	<b>9</b>
2.1. Diferencias con Rayos Cósmicos . . . . .	9
2.2. Algoritmo de Búsqueda . . . . .	11
2.3. Clasificación de Eventos Encontrados . . . . .	12
<b>3. Análisis de los Eventos</b>	<b>17</b>
3.1. Propagación de las Señales . . . . .	18
3.2. Energía Depositada . . . . .	21
3.3. Correlación con Rayos . . . . .	24
<b>4. Conclusiones</b>	<b>27</b>
<b>A. Eventos encontrados</b>	<b>29</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>31</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>35</b>



# Índice de figuras

1.1. Distribución de detectores en el evento 4067441 . . . . .	2
1.2. Distribución de los detectores del Observatorio Pierre Auger . . . . .	3
1.3. Radiación Cherenkov . . . . .	4
1.4. Esquema de una estación de superficie . . . . .	4
1.5. Esquema de un tubo fotomultiplicador . . . . .	5
1.6. Fenómenos eléctricos en tormentas . . . . .	7
2.1. Comparación entre una traza de rayo cósmico y una atípica . . . . .	9
2.2. Humedad ambiente en la primera quincena de octubre del 2007 . . . . .	10
2.3. Comparación entre la medición del dínodo y la del ánodo . . . . .	11
2.4. Verificación de la ausencia de señales en PMT apagados . . . . .	11
2.5. Comparación entre criterios de búsqueda de eventos atípicos . . . . .	12
2.6. Diferencias entre la calibración oficial y la nueva . . . . .	13
2.7. Ejemplo de saturación en una traza . . . . .	13
2.8. Relación entre amplitud y energía de las señales . . . . .	14
2.9. Ajustes realizados en señales extrapoladas . . . . .	15
2.10. Ejemplos de señales diferentes y múltiples . . . . .	15
3.1. Comparación entre funciones de ajuste para señales . . . . .	17
3.2. Relación entre ancho y energía de las señales . . . . .	18
3.3. Relación entre ancho y energía en eventos estándares . . . . .	19
3.4. Ajustes de propagación de las señales . . . . .	20
3.5. Ajustes de energía depositada . . . . .	22
3.6. Anisotropía en la energía depositada . . . . .	23
3.7. Ajuste de propagación en el evento 12871544 . . . . .	25





# Índice de símbolos

Lista de siglas, símbolos y unidades. Se incluye el número de página de su definición o primer uso.

<b>ADC</b>	Unidad de cuentas del FADC, <a href="#">4</a>
<b>CDAS</b>	Sistema Central de Adquisición de Datos, <a href="#">3</a>
<b>DA</b>	Ganancia del ánodo sobre la del último dínodo, <a href="#">11</a>
<b>elves</b>	TLE que ocurre en la parte superior de la mesosfera, <a href="#">6</a>
<b>FADC</b>	Conversor de Analógico a Digital tipo Flash, <a href="#">4</a>
<b>FWHM</b>	Ancho Total a Media Amplitud, <a href="#">18</a>
<b>FD</b>	Detector de Fluorescencia, <a href="#">1</a>
<b>GPS</b>	Sistema de Posicionamiento Global, <a href="#">4</a>
<b>IC100</b>	Intervalos Consecutivos sobre 100 MeV en las trazas, <a href="#">11</a>
<b>PMT</b>	Tubo FotoMultiplicador, <a href="#">3</a>
<b>RC</b>	Rayo Cósmico, <a href="#">1</a>
<b>SD</b>	Detector de Superficie, <a href="#">1</a>
<b>TGF</b>	Flashes Terrestres de rayos Gamma, <a href="#">7</a>
<b>TLE</b>	Evento Luminoso Transitorio (durante tormentas eléctricas), <a href="#">6</a>
<b>UTC</b>	Tiempo Universal Coordinado, <a href="#">2</a>
<b>VEM</b>	Equivalente a Muón Vertical, unidad de señal del WCD, <a href="#">5</a>
<b>WCD</b>	Detector Cherenkov en Agua, componente del SD, <a href="#">1</a>



# Resumen

El detector de superficie del Observatorio Pierre Auger ha sido originalmente diseñado para estudiar las cascadas extendidas de partículas producidas por rayos cósmicos de ultra alta energía. Sin embargo se encontraron también eventos extraños que difieren en la escala temporal de las señales, en la distribución espacial de los detectores involucrados y que además registraron señales producidas por rayos en algunas estaciones. El fenómeno es observado en anillos de detectores con señales que duran  $\sim 10 \mu s$  mientras que los rayos cósmicos usualmente ocurren en  $\sim 0,1 \mu s$ . En el presente trabajo se han estudiado estos eventos con el fin de caracterizarlos y encontrar posibles correlaciones con tormentas eléctricas.

Se desarrolló un algoritmo de búsqueda con el que se encontraron 34 eventos y en estos se analizó la forma de las señales, la propagación y la energía depositada. Se encontró que muchas de las señales, independientemente de su magnitud, se podían describir con una forma genérica. Se definieron así diferentes clases de eventos, según si correspondían o no a esa geometría estándar. Para las que sí lo hacían se estableció la evolución del ancho de las señales en función de su amplitud.

Se realizaron ajustes empleando una fuente puntual y una propagación esférica de las señales, a la velocidad de la luz. De esa manera se obtuvieron buenos acuerdos entre los valores medidos y los ajustados, y se pudieron definir tiempos de inicio de los eventos con precisión de microsegundos. Estos fueron usados para buscar coincidencias con rayos detectados por la World Wide Lightning Location Network (WWLLN) a partir del 2009. Así se encontraron coincidencias a nivel de microsegundos para 2 eventos estudiados y de milisegundos para 2 eventos diferentes, de entre 10 que se pudieron considerar.

También se realizaron ajustes para la energía depositada en los eventos, usando una función exponencial. Se vio que la nube de puntos presentaba una gran dispersión y al graficar la desviación del ajuste en función de la posición, se concluyó que los fenómenos no eran isotrópicos. Además se obtuvieron longitudes de atenuación que correspondían a electrones de entre 200 MeV y 1 GeV o fotones de a partir de 10 MeV. Estos últimos serían compatibles con los observados en Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGFs) pero aún es necesario un modelo que explique la aceleración de las partículas de la nube hacia el suelo para poder contrastar.

**Palabras clave:** OBSERVATORIO PIERRE AUGER, RAYOS ELÉCTRICOS, TORMENTAS

# Abstract

The surface detector at the Pierre Auger Observatory has been originally designed to detect extended air showers caused by ultra high energy cosmic rays. We have also found some strange events that differ in the time-scale and the spacial distribution of the detectors involved, and that have lightning induced signals in some stations. The phenomena observed is found in a large amount of detectors placed in ring shapes with signals lasting  $\sim 10\mu\text{s}$  while a cosmic ray usually occurs in  $\sim 0.1\mu\text{s}$ . In the present work we have studied these events to characterize them and to find a possible correlation with thunderstorms.

We have developed a search algorithm and we have found 34 events in which we have analyzed the general shape of the signals, the propagation and the deposited energy. We have found that some of the signals had a certain relation between its amplitude and energy, which we used to define a group of “standard” events with the ones geometrically alike. Among them we also found correlation in the evolution of width versus energy.

We have done fits using a point source and a spherical propagation of the signals, at the speed of light. It showed good agreement between the measured values and the fitted ones, and it provided a way to define the beginning time of the events at microsecond precision. Using it, we searched for coincidences with lightnings reported by the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) since 2009. We have found 2 coincidences on microsecond scale for the studied events and 2 on millisecond scale for different ones, among 10 events that happened since 2009.

We have made also deposited energy fits using an exponential function. The cloud of points is sparse, and plotting the ratio between the data and the fitted values, we found an anisotropy in the deposited energy. From the fits, we also got attenuation lengths that are compatible with 200–1000 MeV electrons or  $> 10$  MeV photons. The last ones are in the same energy range than the photons in Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGFs) but a model explaining the cloud-to-ground acceleration is still needed to be more conclusive.

**Keywords:** PIERRE AUGER OBSERVATORY, LIGHTNING, THUNDERSTORM



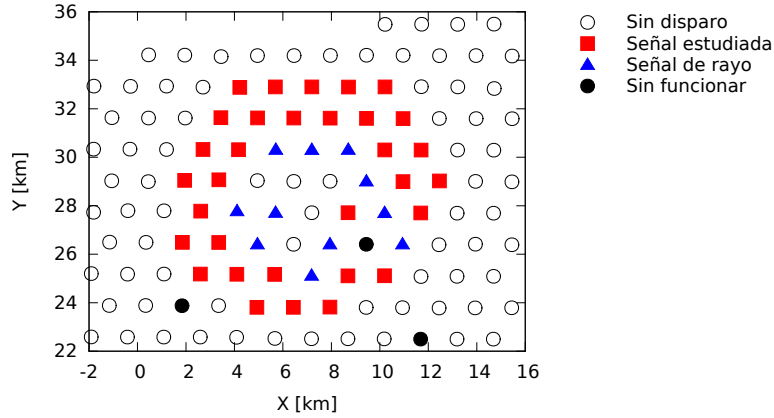
# Capítulo 1

## Introducción

El Observatorio Pierre Auger se encuentra instalado en Malagüe, provincia de Mendoza, Argentina. Fue completado en el año 2008 pero se encuentra tomando datos desde el 2004. El Observatorio consiste en un arreglo de más de 1600 detectores Cherenkov en agua (WCD, del inglés *Water Cherenkov Detector*) que componen el detector de superficie (SD, del inglés *Surface Detector*), y 24 telescopios de fluorescencia (FD, del inglés *Fluorescence Detector*). Estos últimos registran imágenes de la luz ultravioleta fluorescente excitada en la atmósfera por las cascadas de partículas producidas por rayos cósmicos (RC). Por otro lado, el SD detecta el desarrollo horizontal de dichas cascadas. De esta manera, el Observatorio es un sistema híbrido que integra ambos tipos de mediciones para estudiar el origen de los RC.

Además de los rayos cósmicos, existen otros mecanismos que producen señales en los detectores y son estudiados por miembros de la Colaboración Pierre Auger. En particular existen unas decenas de eventos cuyas características sugieren la presencia de un fenómeno de naturaleza distinta a los RC. El primero de ellos ha sido descrito en una nota técnica interna [1] y es el objetivo del presente trabajo analizar ese grupo de eventos atípicos. Más adelante, en la sección 1.1, se describirán en detalle el detector de superficie y la adquisición de datos.

En primer lugar se descubrió la existencia de los eventos mencionados debido a la gran cantidad de WCDs involucrados en su detección. La característica distintiva en dichos eventos fue la distribución espacial de los detectores, siendo que las estaciones activas se ubicaron en anillos en cuyo centro no fueron disparadas, como puede verse en la figura 1.1. También participaron detectores con señales de alta frecuencia. Debido a que los rayos inducen ese tipo de ruido en los cables de los WCDs, esos datos hacen suponer una correlación con tormentas eléctricas. En el capítulo 2 se detallarán las características de estos eventos que aquí se mencionan brevemente.



**Figura 1.1:** Detectores que formaron parte del evento 4067441 que tuvo lugar el 14 de octubre del 2007 a las 20:22:58 UTC. Las estaciones con señales relacionadas al fenómeno estudiado se distribuyeron en un anillo en cuyo centro los detectores observaron ruido de alta frecuencia o no informaron detecciones (sin disparo). Alejado del anillo se observaron algunas estaciones con eventos de rayos cósmicos en coincidencia casual que no se muestran en la imagen.

Durante las tormentas eléctricas se producen diversos fenómenos que aceleran partículas y podrían ser causantes de los eventos detectados. Más adelante, en la sección 1.2 se mencionarán estos fenómenos y sus posibles consecuencias.

## 1.1. Observatorio Pierre Auger

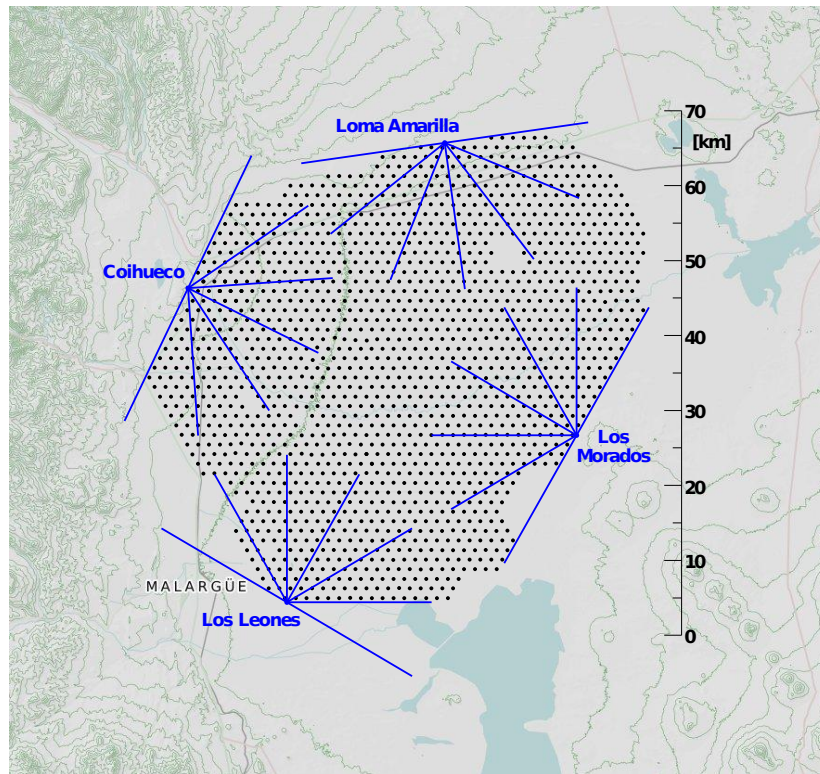
Con el objetivo de analizar diversas características de los rayos cósmicos, el Observatorio conjuga dos tipos de detectores. Durante el presente trabajo se emplearon los datos obtenidos por las estaciones Cherenkov en agua que se describen a continuación.

### 1.1.1. Detector de superficie

El emplazamiento de los detectores Cherenkov en agua y los sitios de los telescopios de fluorescencia puede observarse en la figura 1.2. El SD consiste en 1660 estaciones distribuidas en una red triangular, con 1,5 km de separación y cubriendo un área de 3000 km<sup>2</sup>. Cada una es un tanque cilíndrico de 10 m<sup>2</sup> de superficie y 1,5 m de altura. En su interior contiene 12 m<sup>3</sup> de agua ultra purificada, que ocupan el tanque hasta una altura de 1,2 m.

La detección de las partículas que atraviesan el agua se realiza gracias al fenómeno de radiación Cherenkov [3]. Cuando una partícula cargada se desplaza en un medio a una velocidad mayor que la correspondiente a la luz allí, se produce una radiación (fotones) en un frente cónico dirigido en la dirección de movimiento de la partícula (como puede verse en la figura 1.3). Para poder detectar los fotones creados, el agua se encuentra dentro de una bolsa de un material que los refleja de manera difusa. Así se





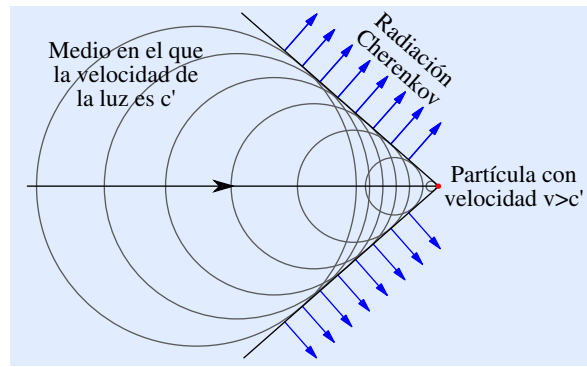
**Figura 1.2:** Distribución de los detectores que conforman al Observatorio Pierre Auger. En azul, con los nombres Loma Amarilla, Los Morados, Los Leones y Coihueco, se muestran los sitios en los que están instalados los telescopios de fluorescencia. Los 1660 puntos negros representan las estaciones de superficie, separadas 1,5 km entre sí. La imagen fue modificada a partir de [2].

crea un “gas de fotones” en el líquido que permite que algunos incidan sobre uno de los tres tubos fotomultiplicadores (PMT, del inglés *PhotoMultiplier Tube*) de 9 pulgadas de diámetro, que se encuentran en la parte superior y cuya ubicación está representada en la figura 1.4. Las estaciones también cuentan con un sistema de alimentación compuesto por un panel solar y una caja de baterías, lo cual permite el abastecimiento de energía eléctrica para su funcionamiento constante.

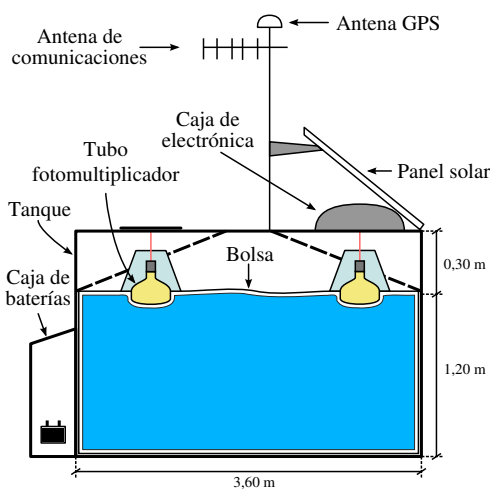
Para la obtención de los datos, una caja de instrumentos electrónicos se ubica en la parte superior del tanque y estos son los encargados de procesar la señal recibida de los PMTs. Los eventos detectados son luego transmitidos hacia el sistema central de adquisición de datos (CDAS, del inglés *Central Data Acquisition System*) a través de la antena de comunicaciones con la que cuenta cada estación.

### 1.1.2. Almacenamiento de datos medidos

Las estaciones del Observatorio se encuentran continuamente midiendo. Cuando los fotones inciden en un PMT, se producen electrones en su fotocátodo por efecto fotoeléctrico, que luego son multiplicados por un sistema de dínodos a los que se les aplica una diferencia de potencial. Un esquema del funcionamiento de un tubo fotomultiplicador puede verse en la figura 1.5. La adquisición de la estación se produce en



**Figura 1.3:** En un medio donde la velocidad de la luz es  $c'$ , cuando una partícula se mueve con velocidad  $v > c'$  se produce un fenómeno conocido como radiación Cherenkov. Este es empleado en las estaciones de superficie del Observatorio para detectar partículas en su interior.

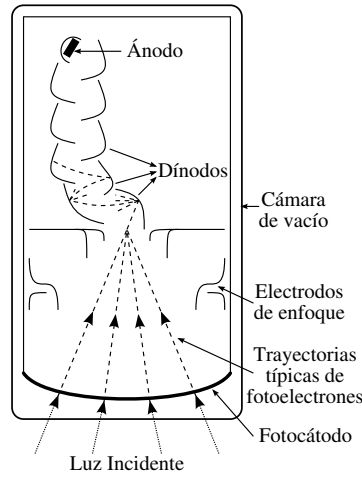


**Figura 1.4:** Esquema de una estación de superficie y foto de una como ejemplo. En el gráfico de la izquierda puede verse el agua ultra purificada en el interior del tanque, ocupando una altura de 1,2 m. Además se muestran dos de los tres tubos fotomultiplicadores de 9 pulgadas que colectan los fotones de la radiación Cherenkov en el agua producida por partículas relativistas. La foto del WCD fue tomada de [4].

el último dínodo y el ánodo. La respuesta de los PMTs es de alta ganancia y lineal con la cantidad de fotones incidentes, lo que permite detectar intensidades de luz muy bajas.

Las 6 salidas de los PMTs, dos de cada uno de los tres presentes, son convertidas a señales digitales usando conversores FADC (del inglés *Flash Analog to Digital Converter*) con 40 MHz de frecuencia de muestreo. De esta manera se obtienen mediciones de cantidades de cuentas ADC en función del tiempo, en intervalos de 25 ns.

Para determinar si lo medido corresponde a un evento que deba almacenarse existen niveles de disparo, o *triggers*, implementados en la electrónica. Hay cinco condiciones de trigger que en orden de aplicación son: T1 y T2 dentro de la estación; T3, T4 y T5 en CDAS. Los primeros dos se realizan teniendo en cuenta la intensidad y forma de la señal adquirida, T3 analiza la ocurrencia del evento en otras estaciones y los últimos imponen condiciones de calidad para la reconstrucción del fenómeno subyacente.



**Figura 1.5:** Esquema de un tubo fotomultiplicador. Los fotones que inciden sobre el fotocátodo son convertidos a electrones por medio del efecto fotoeléctrico. Luego son acelerados hacia un arreglo de placas metálicas, llamadas díodos, donde se multiplican en número hasta incidir sobre un colector denominado ánodo.

Dentro de cada estación se analiza si la medición que se lleva a cabo supera la primer condición de disparo, T1. Esta se alcanza si la medición actual supera un umbral de cuentas, *threshold*, o si se sobrepasa una cantidad menor pero durante un cierto tiempo, *time over threshold*. Al obtenerse un nivel T1, la señal medida es almacenada en la memoria de la estación. Para ello se guardan algunos intervalos anteriores y posteriores al momento donde se produjo el trigger, con lo que se forma la denominada traza. Durante los eventos las trazas son conformadas con 768 intervalos, siendo aproximadamente 256 (o 240) anteriores y 512 (o 528) posteriores a la ocurrencia del disparo (dependiendo de la versión de la electrónica).

La condición T2 difiere de la T1 en que el umbral es más alto y, al alcanzarla, se avisa al CDAS de la ocurrencia del disparo. Este último, en ventanas de algunos segundos, almacena la ubicación y tiempo de los T2 para evaluar si se alcanza la condición T3, vinculada a la distribución de las estaciones involucradas en los disparos. En caso de obtener el trigger T3, se consulta a todas las estaciones por la ocurrencia de condiciones T1 y luego se almacena el evento para ser procesado.

En cada estación, parte del procesamiento de las mediciones consiste en una calibración [5]. Para ello se toman trazas más cortas, de 20 intervalos, y se elabora un histograma de la energía promedio depositada por cada evento. De esta forma se obtiene la equivalencia en cuentas ADC de la energía depositada por un muón vertical central (VEM, del inglés *Vertical Equivalent Muon*). Luego, como la altura del agua en el tanque es conocida, la energía que deja un muón por unidad de longitud puede ser aproximada por

$$1 \text{ VEM} = h_{\text{agua}} \cdot \frac{dE}{dx} \approx 1,2 \text{ m} \cdot 2 \frac{\text{MeV}}{\text{cm}} = 240 \text{ MeV} \quad (1.1)$$

para los tanques empleados. Además del histograma mencionado, la calibración consiste en ajustar el valor de la línea de base a partir de un histograma de la misma y establecer la relación carga sobre pico (energía sobre amplitud) de un VEM usando, también, un histograma de amplitudes.

Los eventos detectados en el Observatorio son guardados en una base de datos usando el formato `root` [6]. Para este trabajo, se elaboraron programas en `C++` que permitieron analizar lo acontecido en cada evento y obtener así información sobre las señales medidas.

Para almacenar los datos, los eventos son agrupados por el CDAS cada aproximadamente 12 horas. De este modo, en la base de datos los archivos ocupan en promedio 75 MB y puede llegar a haber archivos de hasta 300 MB. Sobre cada evento se almacena toda la información obtenida de cada estación, como la señal vista por el ánodo y el dínodo de cada uno de los tres PMTs y sus datos de calibración.

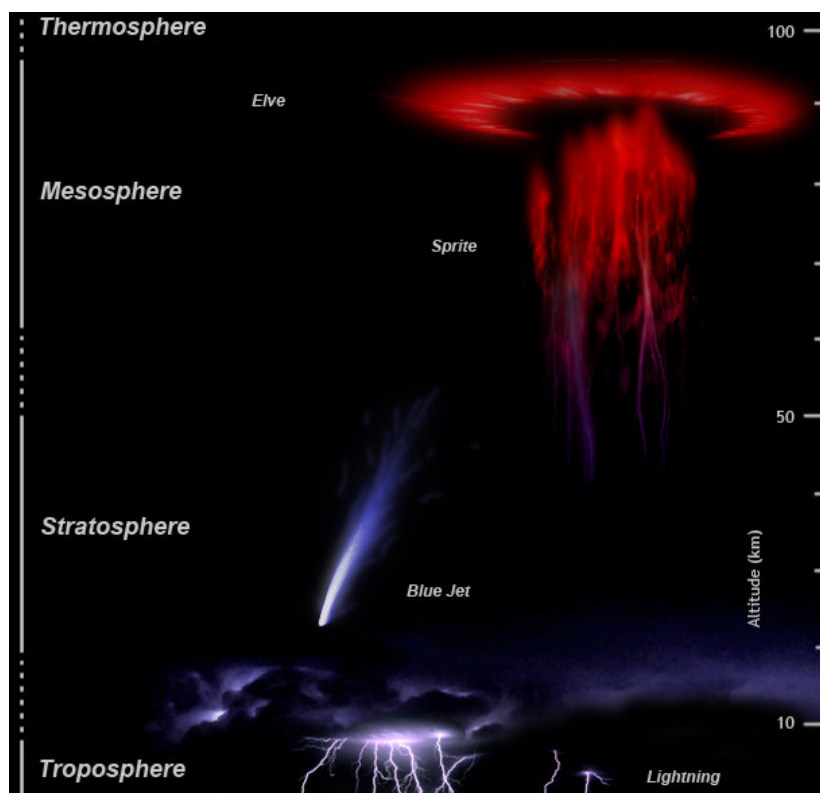
## 1.2. Descargas Eléctricas en Tormentas

Durante las tormentas eléctricas se producen rayos entre las nubes o entre ellas y el suelo. Estos forman parte de un conjunto más grande de descargas eléctricas transitorias (TLE, del inglés *Transient Luminous Events*). Se han observado tres tipos de fenómenos luminosos entre las nubes y la parte superior de la atmósfera: *blue jets*, *sprites* y *elves*. En la figura 1.6 se muestran las alturas y morfologías características de los TLE.

Debido a los grandes campos eléctricos involucrados y al corto tiempo en el que se producen los rayos, estos generan ondas electromagnéticas de cientos de microsegundos y frecuencias en la escala de los kHz que permiten detectarlos en distancias de hasta aproximadamente 50 km [8]. En el Observatorio Pierre Auger los cables presentes en las estaciones hacen de antenas para este tipo de fenómenos. Por ello se cuenta con un filtro en el análisis oficial de los datos que permite diferenciarlos realizando una transformada de Fourier y buscando la presencia de altas frecuencias.

Los *blue jets* se producen desde la parte superior de las nubes, a 20 km o menos de altura, hacia arriba. Se propagan desde la troposfera a la estratosfera, llegando a poseer hasta 20 km de longitud y, aparentemente, no están asociados a la ocurrencia de rayos. [9, p. 480]. Por otro lado, los fenómenos conocidos como *sprites* son descargas transitorias de baja luminosidad que se dan en la mesosfera, a altitudes de hasta 90 km, durante grandes tormentas eléctricas [9, p. 485].

Los *elves* (del inglés *Emissions of Light and Very low frequency perturbations due to Electromagnetic pulse Sources*) fueron denominados de esa manera por Fukunishi *et al.* [10]. Son eventos transitorios de baja luminosidad que se producen en la parte superior de la mesosfera. Los campos eléctricos asociados a los rayos funcionan como fuentes



**Figura 1.6:** Fenómenos eléctricos y luminosos que tienen lugar en la atmósfera en periodos de tormentas. La imagen fue modificada a partir de [7].

electromagnéticas pulsadas que provocan la aceleración de electrones en la base de la ionosfera. Estos, al colisionar con el aire, aumentan el nivel de ionización del medio y provocan emisiones ópticas que se producen a 100 km de altura y tienen forma de anillo, de cientos de kilómetros de diámetro, con duraciones típicas menores a 1 ms [11].

Además de los TLE mencionados, los campos eléctricos existentes en las nubes provocan emisiones de electrones y, consecuentemente, neutrones y fotones [12]. Algunos electrones acelerados en las nubes se ven inmersos en un campo eléctrico lo suficientemente intenso como para que ganen más energía entre colisiones que la que pierden al interactuar con las partículas del medio [13]. Es por esto que fueron denominados por Gurevich *et al.* [14] como “electrones que escapan” (*runaway electrons*) y podrían llegar a desarrollar velocidades relativistas con energías de hasta 50 MeV si fuesen originados por cascadas producidas por rayos cósmicos [15]. Incluso mediciones recientes han detectado flujos de estos hacia el espacio durante tormentas [16].

Además de los electrones, los fotones producidos dan lugar a eventos conocidos como Flashes Terrestres de Rayos Gamma (TGF, del inglés *Terrestrial Gamma-ray Flash* [17]. Se han observado fotones de hasta 20 MeV desde el espacio asociados a estos fenómenos [18]. En el presente trabajo, las señales detectadas en los eventos estudiados podrían ser generadas por electrones acelerados o fotones producidos de manera similar a los fenómenos descritos, pero de la nube hacia el suelo.

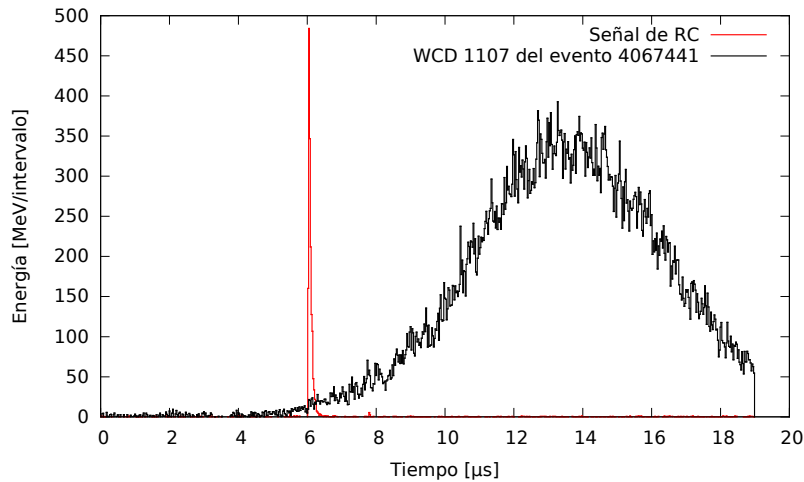


## Capítulo 2

# Caracterización de Eventos Atípicos

### 2.1. Diferencias con Rayos Cósmicos

Las trazas registradas en los detectores de los eventos estudiados en este trabajo fueron distintas a las que dejan las partículas de una cascada producida por un RC. Como ejemplo puede verse una de las trazas del evento 4067441 en la figura 2.1. Las escalas de tiempo involucradas en ambas señales son muy diferentes, siendo de algunas décimas de microsegundos para los rayos cósmicos y decenas de  $\mu\text{s}$  en las trazas atípicas. La mayor duración de estas últimas se traduce en una mayor cantidad de intervalos de tiempo en los que se depositó energía. En la siguiente sección veremos que esto permite establecer un criterio para la búsqueda de eventos atípicos.

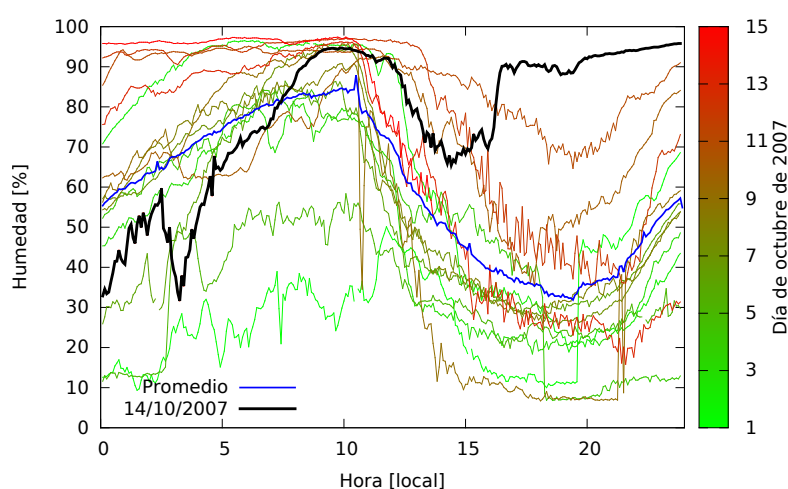


**Figura 2.1:** Comparación entre las trazas correspondientes a un evento típico de rayo cósmico y al evento 4067441, para una sola estación.

Otra característica distintiva de los eventos estudiados es la presencia de ruido de alta frecuencia en algunas de las estaciones activas. Este es asociado a señales provocadas por rayos, lo que sugiere que los eventos ocurrieron durante tormentas eléctricas.



El evento 4067441, ocurrido el 14 de octubre del 2007 a las 20:22:58 UTC, fue uno de los estudiados. Empleando una estación meteorológica ubicada en el centro del SD, se graficó el porcentaje de humedad ambiente en función de la hora para la primera quincena de octubre del 2007. Puede verse en la figura 2.2 que la evolución de la humedad para el día 14 sugiere la presencia de lluvia durante la tarde. A partir de las 16 horas locales se muestra un fuerte aumento de la humedad, que no suele darse en el resto de los días según el promedio de ellos. Como el evento se produjo alrededor de las 20 horas UTC (equivalente a las 17 horas local) durante la ocurrencia del mismo pudo haber una tormenta.

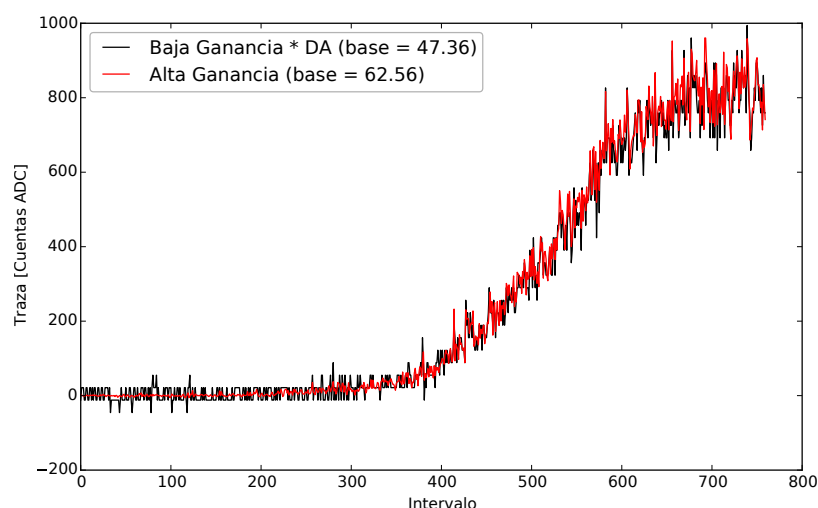


**Figura 2.2:** Humedad ambiente en función de la hora durante la primer quincena de octubre del 2007. Se resaltó la línea correspondiente al día 14 y se agregó el promedio de todos los días. Para la confección del gráfico se usaron los datos de una estación meteorológica ubicada en el centro del detector de superficie.

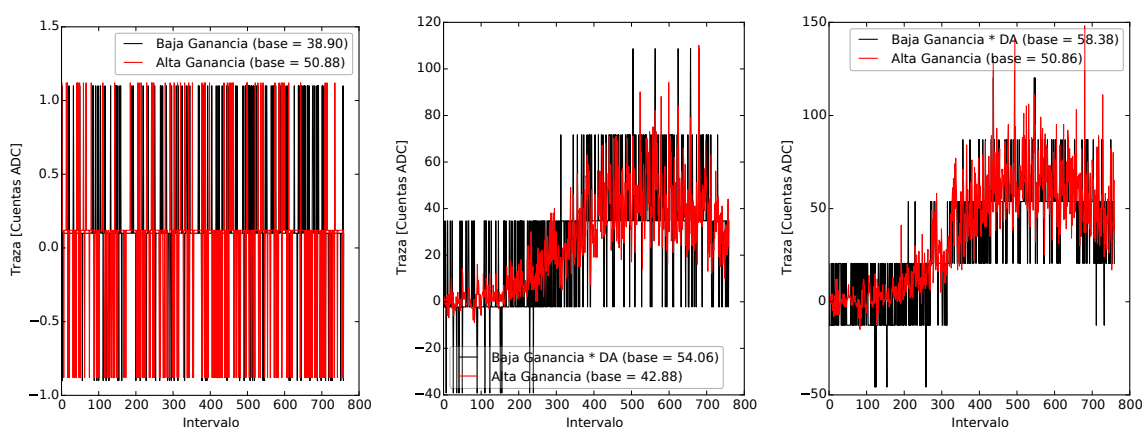
Para verificar si las señales registradas por las estaciones procedían de luz en el interior del tanque, se realizaron distintas pruebas. En primer lugar se comprobó que la relación entre dínodos y ánodos era la correcta, descartando así que la señal sea ruido inducido en los cables. Para ello se graficaron las trazas obtenidas en ambos canales, multiplicando la de baja ganancia por el factor correspondiente dado por la calibración de la estación. De esta manera se obtuvieron resultados como el de la figura 2.3, que muestran que ambos canales coinciden.

Otra verificación realizada para afirmar que los eventos no fueron producto de ruido en los cables, fue comprobar que los PMTs apagados no detectaron señales. En la figura 2.4 puede verse, como ejemplo, al WCD 147 del evento 1668130 donde 2 PMTs muestran la señal estudiada y el tercero, apagado, muestra ruido de fondo. Además analizando los registros de las estaciones, se verificó que los detectores en el “hueco” de los anillos realmente no observaron señales ya que se encontraban enviando eventos T1 y T2 en esos periodos a un ritmo normal.





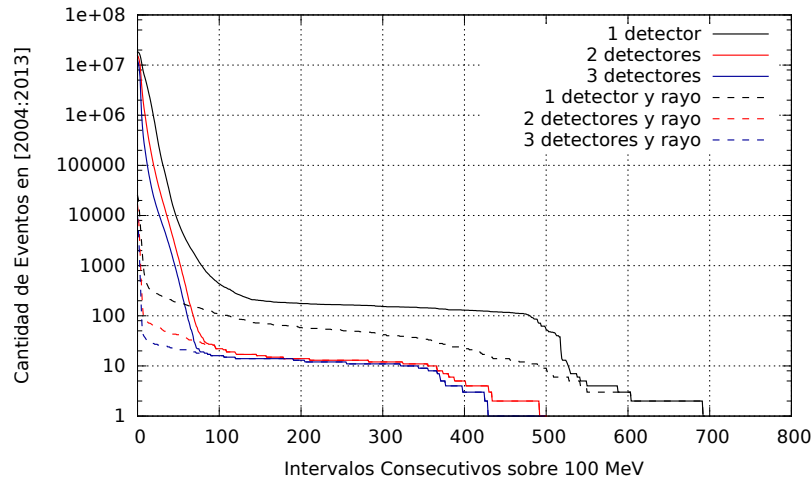
**Figura 2.3:** Trazas obtenidas para el PMT 1 del WCD 715 en el evento 1332969. Se muestra que el canal de baja ganancia multiplicado por el factor DA, correspondiente a la relación dínodo sobre ánodo, coincide con el canal de alta ganancia.



**Figura 2.4:** Trazas obtenidas para los PMTs (0, 1 y 2; de izquierda a derecha) del WCD 147 en el evento 1668130. Puede verse que tanto el PMT 1 como el PMT 2 muestran señales como las estudiadas mientras que el PMT 0 estuvo apagado y no las detectó. Para este último no se multiplicó por DA ya que tenía valor 0 por estar apagado.

## 2.2. Algoritmo de Búsqueda

La búsqueda de los eventos atípicos se realizó filtrando la lista de todos ellos, con algunos criterios aplicados a las trazas con la calibración oficial que realiza el CDAS. El primero de ellos fue requerir una cierta cantidad de Intervalos Consecutivos por encima de 100 MeV (IC100). Además se pidió una cierta cantidad mínima de detectores que superaran ese filtro. Tomando 1, 2 o 3 estaciones como umbral, se obtuvieron los resultados de la figura 2.5. Allí puede verse una gran diferencia entre al menos 1 WCD y 2 o 3 de ellos. Eso se debió a que en algunos eventos el mal funcionamiento de algún detector provocó señales que no eran similares a las trazas buscadas. Debido a la poca cantidad de estaciones en esa condición, no hubo más de una por evento y pudieron ser excluidos tomando al menos 2 WCDs que superaran el primer filtro.



**Figura 2.5:** Comparación entre criterios de búsqueda. Se analizaron todos los eventos registrados desde el 2004 al 2013 inclusive. Para cada  $x$  se contaron aquellos eventos en los que al menos 1, 2 o 3 detectores tuvieron señales con más de  $x$  intervalos consecutivos sobre 100 MeV. Las líneas discontinuas representan los resultados al pedir también que al menos un WCD del evento haya registrado señal de rayo.

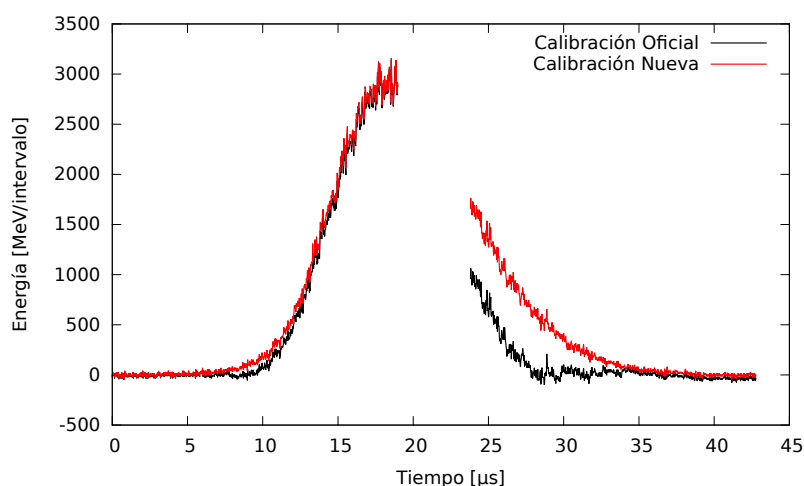
A partir de algunas decenas de IC100 puede verse una meseta en el histograma que sugiere la presencia de algún fenómeno. En línea discontinua se muestran los mismos criterios aplicados a los eventos que tienen al menos un WCD con señal de rayo. Así puede verse que para 2 o más detectores la meseta está compuesta solamente por eventos con señales de rayo.

En el histograma para 2 o más WCDs y rayo, la pendiente abrupta del comienzo termina en aproximadamente 20 IC100. Se observaron los eventos a partir de allí, en total 64, y de ellos los que no poseían más de 60 IC100 resultaron muy pequeños (con 10 WCDs activos en cada evento) dificultando su análisis. Se podrían volver a analizar en el futuro una vez completado el algoritmo de reconstrucción ideado en este trabajo. A partir de 60 IC100 se obtuvieron 34 eventos, con 2 dobles. En el apéndice A puede consultarse una lista de ellos.

## 2.3. Clasificación de Eventos Encontrados

Estudiando las trazas de los eventos hallados con la calibración oficial se encontró que en algunas había irregularidades en forma de escalones, como puede verse en la figura 2.6. Para verificar la veracidad de ese comportamiento, se recuperaron las mediciones de cada canal (los 6 de cada WCD) y se calculó una nueva traza calibrada.

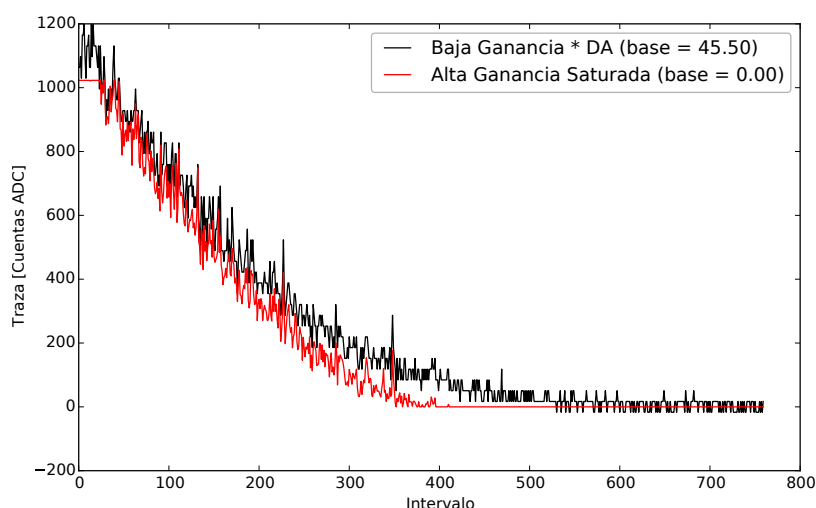
Oficialmente la línea de base se calcula tomando promedios por trozos de la señal. Sin embargo, debido a la larga duración de las señales estudiadas en este trabajo, dicho algoritmo falla en estos casos. El método usado para la nueva calibración consistió en calcular la línea de base tomando el promedio de los primeros 50 intervalos y los



**Figura 2.6:** Traza registrada en el evento 1332968 por el WCD 580 con la calibración oficial y la introducida en este trabajo. Puede verse que un comportamiento más suave usando la nueva y una gran diferencia en la energía depositada.

últimos 50. Luego se tomó el menor entre ambos valores y con este se supuso una línea de base constante a lo largo de la traza.

Una vez obtenidas las líneas de base para cada canal, se analizaron las trazas en búsqueda de saturaciones. Se tomó como tal tanto la superación del máximo de cuentas ADC, 1024, como la presencia de señales cortadas inferiormente, mostrada por líneas de base de valor 0 según el método empleado en este trabajo. Un ejemplo de ambas saturaciones se muestra en la figura 2.7.



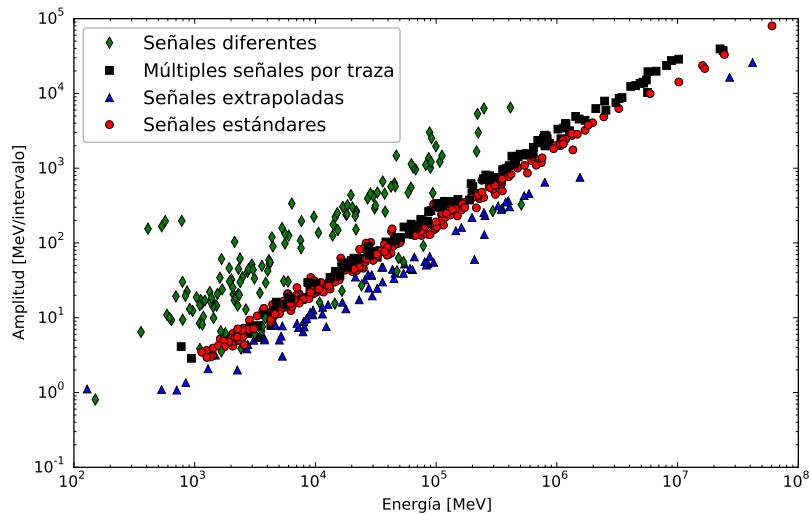
**Figura 2.7:** Trazas obtenidas por el PMT 2 del WCD 727 en el evento 1332968. Se muestra que el canal de ganancia alta estuvo saturado tanto al comienzo (por superar la cantidad de cuentas máxima) como al final, donde hace que la línea de base definida como el promedio de los últimos 50 intervalos sea 0.

Si algún canal de alta ganancia se encontraba saturado se tomaba como traza calibrada el promedio de los de baja ganancia, multiplicados por la relación dínodo sobre ánodo de cada uno. En caso contrario, se tomaba el promedio de los de alta

ganancia. En ambas situaciones, el promedio se realizó luego de haber restado la línea de base a las trazas.

Así se vio que los escalones no eran reales sino introducidos por un error en el cálculo de la línea de base. A pesar de que la búsqueda se realizó utilizando la oficial, en el resto del presente trabajo se empleó la nueva calibración. Se deja como trabajo a futuro la implementación de la búsqueda sobre las trazas correctamente calibradas aunque no se esperan diferencias sustanciales con el resultado obtenido aquí.

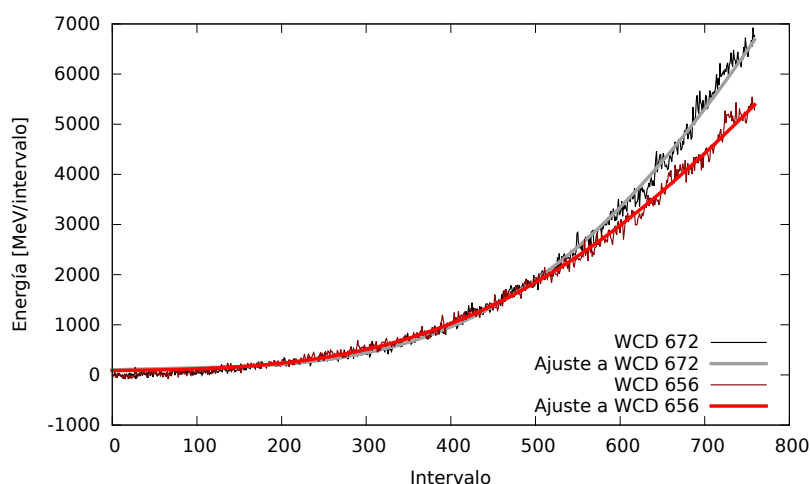
Una vez apropiadamente calibradas, las señales detectadas en los eventos resultaron ser de distintas geometrías. Tomando la más completa en los eventos estudiados, se la usó como modelo para ajustar las demás trazas (ver capítulo 3 por más detalles) y así se obtuvieron los parámetros característicos de cada señal. Estos fueron la amplitud, la energía depositada (integral de la señal), el ancho y un tiempo característico (definido en función de la posición del máximo y el ancho). Se graficó la amplitud de las señales en función de la energía depositada, figura 2.8, y se observó cada traza a fin de clasificarlas. Las pertenecientes al grupo central del gráfico poseían una geometría similar entre sí y correspondiente a las señales estudiadas por lo que se las denominó “estándares”.



**Figura 2.8:** Relación entre amplitud y energía para las señales detectadas en los eventos encontrados. Se observan cuatro tipos de eventos lo cuales son detallados en el texto. Entre ellos, se denominaron “estándares” aquellos que fueron estudiados en profundidad.

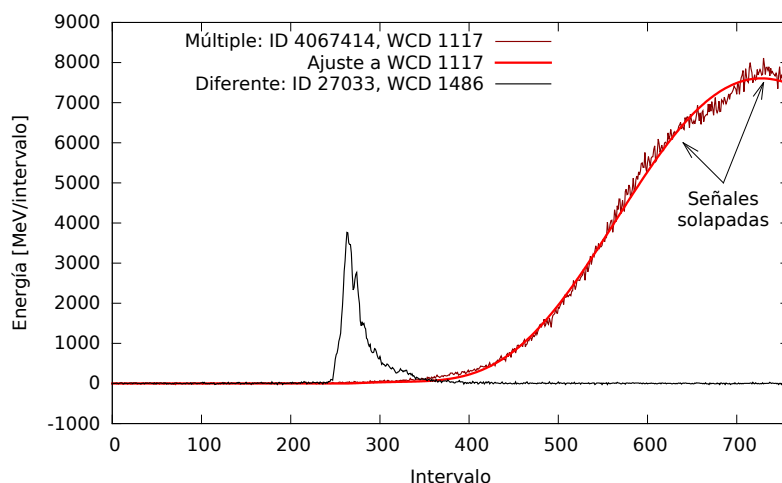
Con menores amplitudes para las mismas energías que los estándares se hallaron 4 eventos cuyas trazas solo mostraban el comienzo de las señales, por lo que no se contaba con suficiente información para un ajuste correcto. Un ejemplo de estos puede verse en la figura 2.9 y se los clasificó como “extrapolados” ya que el ajuste luego del máximo no podía ser verificado.

Entre los eventos estándares se encontraron algunos con dos señales por traza, que se clasificaron como “múltiples”. En estos se observaban dos señales solapadas que daban lugar a un ajuste erróneo como el mostrado en la figura 2.10. Por último se



**Figura 2.9:** Señales de mayor energía detectadas en el evento 4365444. El ajuste no puede ser verificado más allá de la zona creciente de la señal por lo que este tipo de eventos fue denominado “extrapolado”.

hallaron eventos cuyas señales poseían características visualmente muy distintas a las llamadas estándares y se los denominó “diferentes”. Un ejemplo de estos se muestra en la figura 2.10. En total se hallaron 7 “estándares”, 3 “múltiples”, 4 “extrapolados” y 20 “diferentes”; que pueden consultarse en el apéndice A.



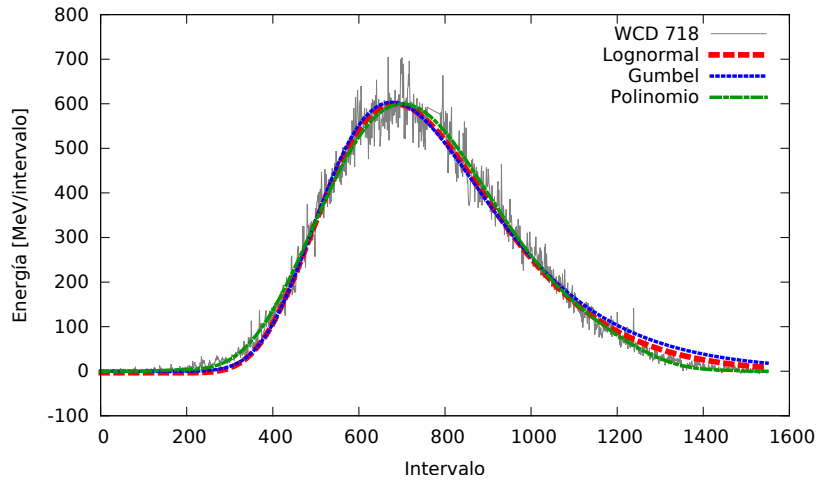
**Figura 2.10:** En el evento 4067414 se observaron 2 señales solapadas en cada traza. Superponiendo el ajuste realizado, puede verse la diferencia con el comportamiento de una sola señal de la misma amplitud. Además se muestra un ejemplo de las señales diferentes que se encontraron.



## Capítulo 3

### Análisis de los Eventos

Para ajustar las señales se utilizó la traza más completa del evento 1332968. Previamente se probaron distintas opciones como las distribuciones lognormal y de Gumbel pero ambas describían erróneamente las características de las señales, sobrestimando la energía depositada al final de estas como puede verse en la figura 3.1.



**Figura 3.1:** Para ajustar las trazas se probó la distribución lognormal y la de Gumbel pero ambas sobrestimaban la energía depositada al final de la señal. Finalmente se empleó un polinomio cuyos coeficientes se ajustaron a un suavizado bezier de la traza en la WCD 718 del evento 1332968.

Debido a que aún no se conocía la física del fenómeno subyacente, se procuró describir las señales de la manera más precisa posible. Por lo tanto se tomó la traza más completa, correspondiente a la combinación de las registradas por el detector 718 en los eventos 1332968 y 1332969. En ella, como puede verse en la figura 3.1, se aplicó un suavizado bezier y se ajustó un polinomio a este último, aumentando su grado hasta que el ajuste no mejorara notablemente. Finalmente se empleó una función coincidente con el polinomio de grado 12, cuyos coeficientes fueron dados por este procedimiento, y valor 0 fuera de la señal, ya que esta última queda comprendida entre dos ceros del polinomio. Modificando su geometría con un factor de escala en  $x$ , en  $y$  y un corrimien-

to en  $x$ , el ajuste a otras trazas se realizó con 3 grados de libertad y se definieron los siguientes parámetros característicos:

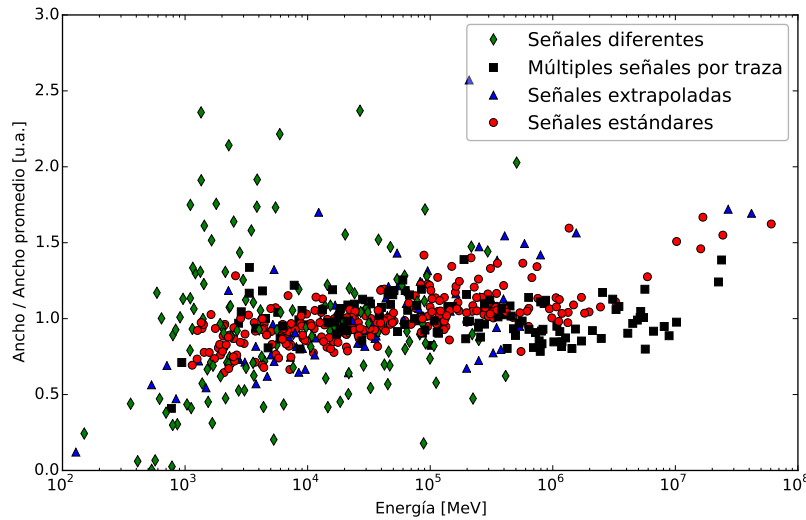
**Amplitud** Máximo de la señal

**Energía** Integral del polinomio

**Ancho** Ancho total a media amplitud (FWHM, del inglés Full Width at Half Maximum)

**Tiempo característico** Posición del máximo menos la mitad del ancho

Para analizar la evolución del ancho en función de la energía, se realizó el gráfico mostrado en la figura 3.2. En este puede verse que las señales estándares se ensanchan a medida que se deposita más energía. En la figura 3.3 se muestra esa evolución sin los otros tipos de eventos.



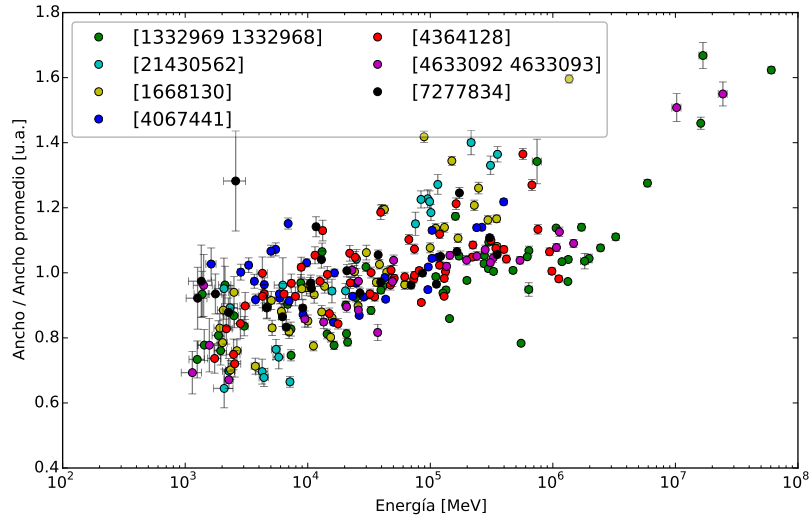
**Figura 3.2:** Relación entre ancho y energía para las señales detectadas en los eventos encontrados.

### 3.1. Propagación de las Señales

Para la dinámica de los eventos, se supuso una propagación esférica desde una fuente puntual. Para cada uno se ajustó una función sobre los tiempos característicos de las señales en función de la posición de las estaciones. Estas tienen asignadas coordenadas  $x$ ,  $y$  y  $z$  respecto al Observatorio, usando el módulo GPS con el que cuenta cada una, y como fuente del fenómeno se ajustó un punto de origen en  $(x_0, y_0, z_0)$  en dicho sistema de referencia.

Inicialmente se hicieron ajustes dejando libre la velocidad de propagación y un factor para restar el ancho a la posición del máximo en el tiempo característico. En cuanto

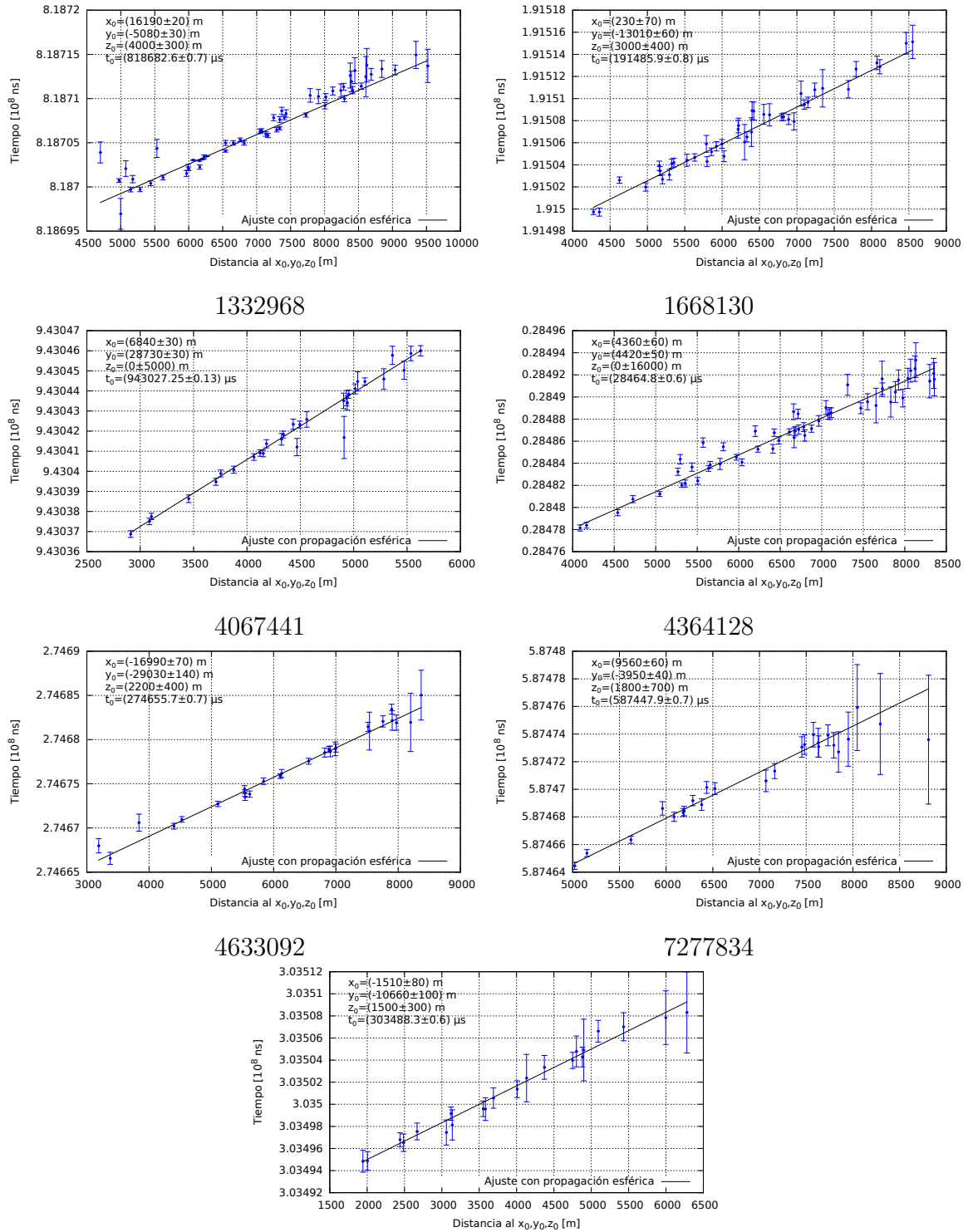




**Figura 3.3:** Relación entre ancho y energía para las señales detectadas en los eventos estándares, cuyos números se indican en la leyenda.

a eso último, debido a la ausencia de un modelo para entender el significado de dicho factor, se decidió fijarlo a 0,5 para eliminar un grado de libertad y poder comparar más claramente los ajustes entre sí. Además se vio que las velocidades obtenidas eran todas compatibles con la velocidad de la luz, pero que dejadas libres daban lugar a incertezas muy grandes en la altura debido a la correlación existente entre ambos parámetros.

Fijando la velocidad a la de la luz, se ajustó el tiempo de inicio  $t_0$  y la posición de la fuente  $(x_0, y_0, z_0)$  del fenómeno. De esa manera se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 3.4 para los eventos estándares. De los 7 ajustes puede verse que en 5 de ellos el valor de la altura de la fuente es de algunos kilómetros, lo cual coincide con una generación del fenómeno en las nubes. En los otros 2, el ajuste no es preciso y devuelve un rango muy amplio de alturas posibles pero que también es compatible con la de las nubes.



**Figura 3.4:** Ajustes realizados en los eventos estándares suponiendo una propagación esférica desde una fuente puntual en  $(x_0, y_0, z_0)$  producida a tiempo  $t_0$  y que se desplaza con rapidez fija a la velocidad de la luz.

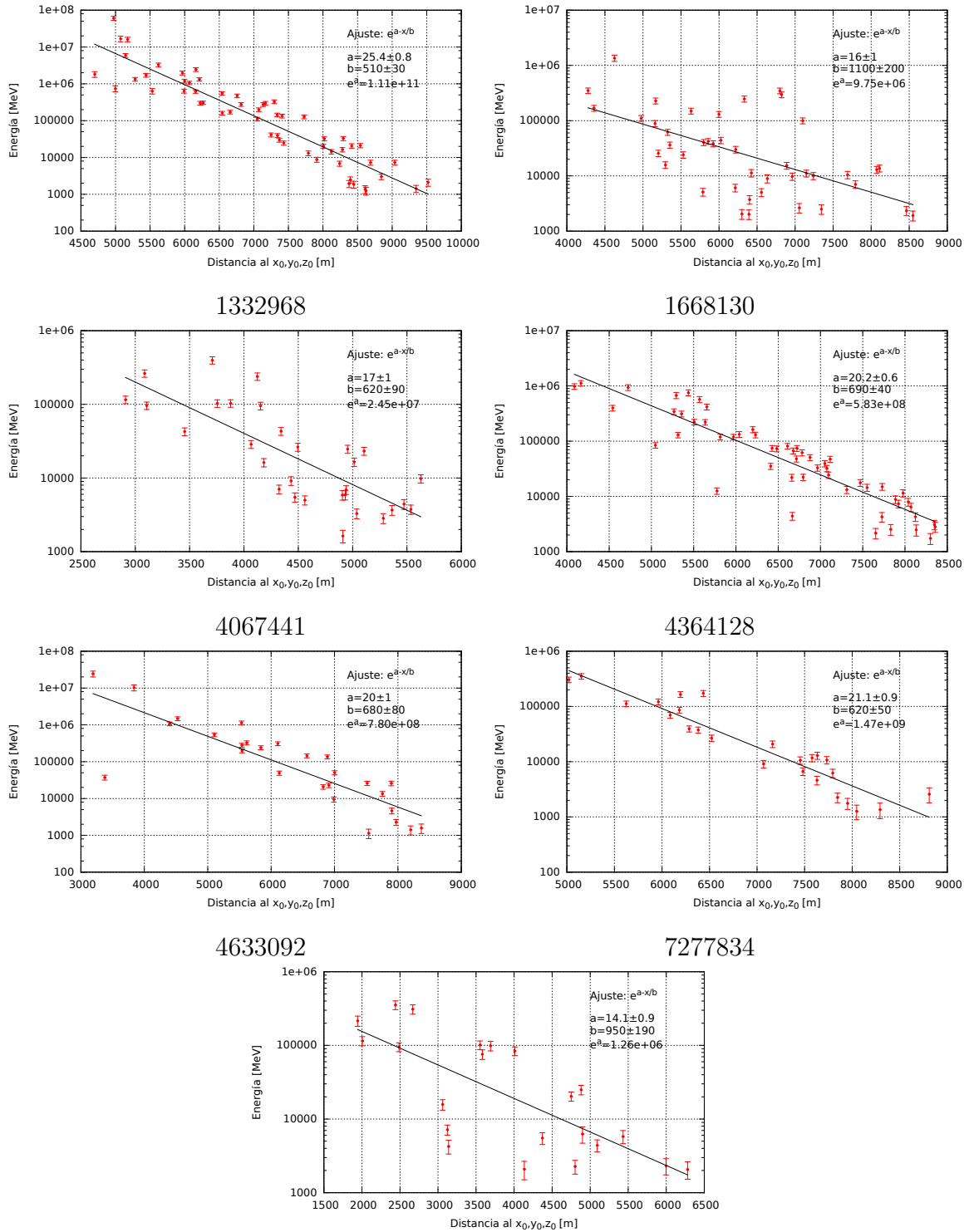
## 3.2. Energía Depositada

Para la energía depositada se hicieron los ajustes mostrados en la figura 3.5. Se propuso como función una exponencial  $e^{a-x/b}$ , con  $x$  la distancia al  $(x_0, y_0, z_0)$  ajustado anteriormente, de manera de realizar un ajuste lineal en escala logarítmica-lineal. Debido a que se esperaba observar un efecto de flujo, también se probó añadir un decaimiento con la distancia como  $\sim 1/x$  o  $\sim 1/x^2$  pero los ajustes resultaron iguales o peores.

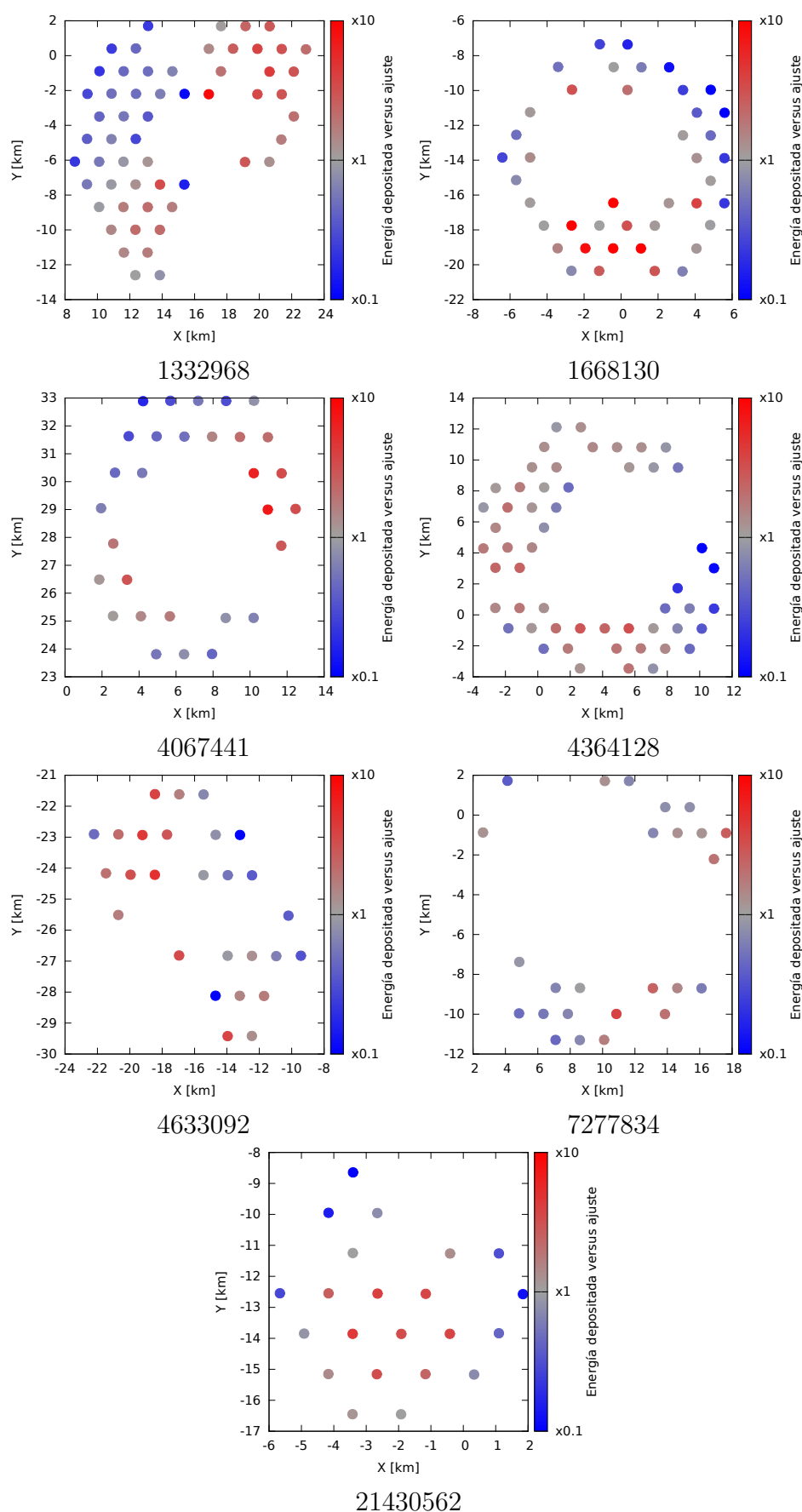
Puede verse una gran dispersión en las nubes de puntos de la energía depositada. Sin embargo esta no fue aleatoria sino que graficando la desviación del ajuste en función de la posición, puede verse que la energía no se deposita isotrópicamente en el espacio (ver figura 3.6).

El parámetro  $b$  ajustado corresponde a la longitud de atenuación de las partículas que producen las señales. Suponiendo que estas fueran electrones y como la densidad del aire es aproximadamente  $10^{-3} \text{ g/cm}^3$ , a partir de tablas de rango para  $e^-$  [19] puede calcularse la energía inicial de las partículas. Para longitudes de entre 500 m y 1100 m en aire, la energía de estas sería de entre 200 MeV y 1 GeV. Para electrones generados solamente en la fuente, dichos valores de energía resultan mucho más grandes que los esperados por efectos de aceleración en las nubes. Sin embargo si las señales estuvieran provocadas por cascadas de ellos, la atenuación sería negativa al comienzo (debido a la producción de partículas) y así podrían explicarse las longitudes halladas, con electrones de menores energías.

Si las partículas detectadas fueran fotones, usando las tablas de sección eficaz de estos [20] puede verse que la atenuación es compatible con energías de más de 10 MeV. Eso es cercano a los valores medidos para TGFs (de los que se habló en la sección 1.2). Sin embargo, aún hacen falta modelos de aceleración hacia abajo de la nube para poder comparar los espectros de partículas aceleradas predichos con los resultados del presente trabajo.



**Figura 3.5:** Ajustes realizados en los eventos estándares suponiendo un comportamiento lineal del logaritmo de la energía depositada en función de la distancia a la fuente del fenómeno (obtenida en el ajuste de propagación).



**Figura 3.6:** Cociente de los ajustes realizados de energía depositada, en los eventos estándares, sobre los valores medidos. Puede verse que la desviación no es aleatoria sino que presentó un comportamiento anisotrópico en el espacio.

### 3.3. Correlación con Rayos

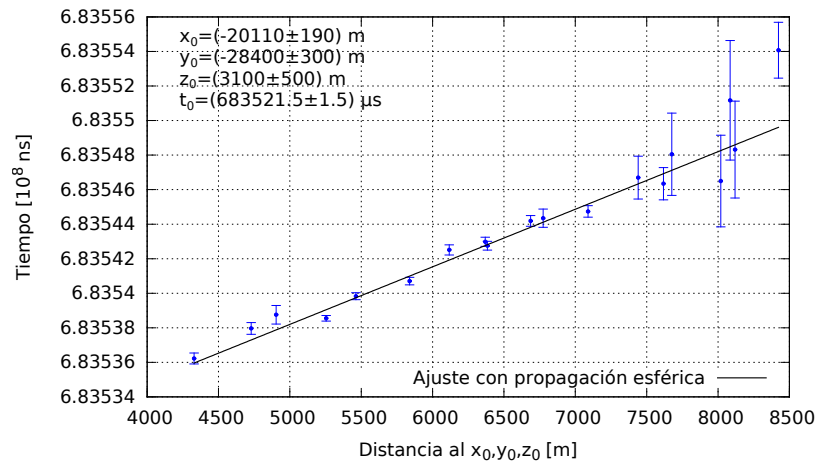
El Observatorio no contaba con los instrumentos requeridos para la detección de rayos hasta el año 2014. Para buscar correlaciones con los eventos estudiados, se usó la base de datos de la WWLLN [21] desde abril del 2009. Esta es una red internacional de monitoreo de rayos que tiene una efectividad de detección total de  $\sim 4\%$  en América del Sur [22]. Sin embargo esta aumenta en función de la carga de los rayos. Por ejemplo se verificó, en Estados Unidos, que teniendo una efectividad total de  $\sim 9\%$  se llega a más de  $35\%$  para los de mayor energía [23]. De los 34 eventos encontrados, 10 se produjeron después de abril del 2009. En la tabla 3.1 pueden verse las coincidencias halladas.

Evento	Fecha y hora [UTC]	Ajuste [ $\mu\text{s}$ ]	Rayo [ $\mu\text{s}$ ]	$\Delta t$
10310854 D	2010/09/27 02:53:51		No	
12871544 M	2011/10/07 19:54:55	$683521,5 \pm 1,5$	$683520 \pm 5$	$-1 \mu\text{s}$
13574856 D	2012/01/15 02:21:28	$617098 \pm 0$	$619874 \pm 15$	2 ms
13578004 D	2012/01/15 20:11:16		No	
27033 D	2012/08/17 01:04:50		No	
20311753 D	2012/10/14 11:37:26	$953539 \pm 0$	$955087 \pm 9$	2 ms
20609206 D	2012/11/29 04:28:15		No	
20609939 D	2012/11/29 06:42:25		No	
21041532 D	2013/02/06 18:35:11		No	
21430562 E	2013/04/03 00:40:24	$303488,3 \pm 0,6$	$303402 \pm 16$	$-76 \mu\text{s}$

**Tabla 3.1:** Para los eventos encontrados que ocurrieron después de abril del 2009, se encontraron coincidencias en el orden de los microsegundos para los dos eventos con señales estudiadas y de milisegundos para los eventos diferentes (columna  $\Delta t$ , el signo “-” indica que el rayo se produjo antes que el evento). A la derecha de cada número de evento se indica su clasificación (Diferente, Estándar o Múltiple). Los tiempos con error nulo corresponden a eventos con igual cantidad de WCD que parámetros en el ajuste de la fuente del fenómeno.

Se encontraron coincidencias de 2 ms para dos de los ocho eventos diferentes considerados, los cuales sucedieron antes que los rayos. Después de abril del 2009 hubo un evento con señales estándares y otro con múltiples señales por trazas. En ambos casos se encontraron rayos en coincidencias del orden de los microsegundos, ocurridos antes que los eventos. Para el 12871544, múltiple, el rayo encontrado se produjo en  $x = -11 \text{ km}$  e  $y = -34 \text{ km}$  según el algoritmo de reconstrucción de la WWLLN (con una resolución espacial de  $\sim 10 \text{ km}$  [22]). Comparando con el ajuste de propagación con el que se obtuvo  $x = (-20,11 \pm 0,19) \text{ m}$  e  $y = (-28,4 \pm 0,3) \text{ km}$ , como puede verse en la figura 3.7, puede decirse que el rayo se ocurrió en las inmediaciones de la fuente del fenómeno ya que la distancia entre ambos fue de  $\sim 11 \text{ km}$ .

Procediendo de manera análoga con el evento estándar, el rayo informado en ese caso se produjo en  $x = -1,5 \text{ km}$  e  $y = -17 \text{ km}$ , según WWLLN, mientras que la reconstrucción arrojó  $x = (-1,50 \pm 0,08) \text{ km}$  e  $y = (-10,6 \pm 0,1) \text{ km}$  como puede verse



**Figura 3.7:** Ajuste realizado en el evento 12871544, cuyas trazas poseían múltiples señales. Se encontró un rayo en coincidencia con este evento, usando los datos de la WWLLN.

en la figura 3.4. Por lo tanto en este caso también se encontró coincidencia espacial y temporal.





# Capítulo 4

## Conclusiones

En el Observatorio Pierre Auger se detectaron eventos atípicos respecto de los rayos cósmicos, que presentaban una distribución en forma de anillo de estaciones de superficie y señales de larga duración. En el capítulo 2 se desarrolló un método de búsqueda de estos a partir de la cantidad de intervalos consecutivos sobre un umbral de 100 MeV en algunos WCD y señales de rayos. De esa manera, se obtuvieron 34 eventos (con 2 dobles) de los cuales no todos presentaban las mismas características.

En la sección 2.3 se vio que los eventos encontrados podían ser clasificados de acuerdo a la forma de las señales. Graficando la amplitud de estas en función de la energía se vio que existía una cierta geometría particular que se repetía en un grupo de eventos, los cuales se denominaron “estándares”. En el presente trabajo se estudiaron mayormente estos últimos.

Se realizaron análisis de la propagación de las señales y la energía depositada en el capítulo 3. Usando una fuente puntual y una propagación esférica a la velocidad de la luz, se obtuvieron buenos acuerdos entre los ajustes y los datos, con una altura para la fuente compatible con la altura de las nubes.

Para la energía depositada se realizó un ajuste exponencial. De esa manera se obtuvo una longitud de atenuación correspondiente a electrones de algunas centenas de MeV o fotones con energías de a partir de 10 MeV. Tomando en cuenta los fenómenos de aceleración detallados en la sección 1.2, los últimos serían compatibles con los valores de energía de los fotones en TGFs pero aún hace falta un modelo que explique la aceleración de estos de la nube al suelo. Además se vio que la energía fue depositada en los detectores de manera anisotrópica.

Por último se encontraron coincidencias entre los eventos estudiados y los rayos detectados por la WWLLN desde el 2009. Entre los 10 eventos ocurridos en ese lapso, hubo 8 diferentes a los estudiados. Se encontraron 2 coincidencias en el orden de los milisegundos para los diferentes y ambos eventos con señales estudiadas coincidieron con rayos tanto espacial como temporalmente, en el orden de los microsegundos.



## Apéndice A

### Eventos encontrados

Evento	Fecha y hora [UTC]	Clasificación
1332968,9	2005/05/04 04:26:58	Estándar
1668130	2005/10/03 19:53:19	Estándar
4067414	2007/10/14 20:10:35	Múltiple
4067430	2007/10/14 20:16:41	Múltiple
4067441	2007/10/14 20:22:58	Estándar
4364128	2007/12/25 06:07:37	Estándar
4364137	2007/12/25 06:08:36	Diferente
4364153	2007/12/25 06:11:09	Diferente
4364209	2007/12/25 06:26:59	Diferente
4364786	2007/12/25 09:26:02	Diferente
4364845	2007/12/25 09:43:57	Diferente
4365402	2007/12/25 12:55:54	Extrapolado
4365444	2007/12/25 13:08:40	Extrapolado
4365446	2007/12/25 13:08:40	Extrapolado
4369106	2007/12/26 23:41:01	Diferente
4469330	2008/01/25 06:50:20	Diferente
4477888	2008/01/28 02:02:15	Diferente
4572085	2008/02/20 16:31:42	Extrapolado
4601504	2008/02/29 01:24:04	Diferente
4601697	2008/02/29 01:52:10	Diferente
4633092,3	2008/03/06 20:00:50	Estándar
7277834	2009/02/21 13:39:31	Estándar
7277835	2009/02/21 13:39:31	Diferente
7277836	2009/02/21 13:39:31	Diferente
10310854	2010/09/27 02:53:51	Diferente
12871544	2011/10/07 19:54:55	Múltiple
13574856	2012/01/15 02:21:28	Diferente
13578004	2012/01/15 20:11:16	Diferente
27033	2012/08/17 01:04:50	Diferente
20311753	2012/10/14 11:37:26	Diferente
20609206	2012/11/29 04:28:15	Diferente
20609939	2012/11/29 06:42:25	Diferente
21041532	2013/02/06 18:35:11	Diferente
21430562	2013/04/03 00:40:24	Estándar

**Tabla A.1:** Eventos encontrados pidiendo al menos 2 SD con más de 60 IC100 y señal de rayo en alguna de las estaciones. La números de eventos separados por coma indican que fueron unidos en el análisis.

# Bibliografia

- [1] Mariş, I. C., Roth, M. 65 stations in one shot. Is this lightning? *GAP-2006-079*, 2006. 1
- [2] Veberic, D. CC-BY-SA 3.0, 2013. URL [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Layout\\_of\\_Pierre\\_Auger\\_Observatory.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Layout_of_Pierre_Auger_Observatory.svg). 3
- [3] Cherenkov, P. A. Visible radiation produced by electrons moving in a medium with velocities exceeding that of light. *Physical Review*, **52**, 378–379, 1937. URL <http://web.ihep.su/dbserv/compas/src/cerenkov37/eng.pdf>. 2
- [4] Observatorio Pierre Auger, 2005. URL <http://auger.org/observatory/gallery2005.html>. 4
- [5] Bertou, X., *et al.* Calibration of the surface array of the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **A568**, 839–846, 2006. URL <http://hal.in2p3.fr/file/index/docid/115164/filename/in2p3-00115164.pdf>. 5
- [6] Rademakers, F., Canal, P., Bellenot, B., *et al.* ROOT. URL <http://root.cern.ch/>. 6
- [7] Abestrobi. CC-BY-SA 3.0, 2008. URL <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Upperatmoslight1.jpg>. 7
- [8] Rakov, V., *et al.* Burst of pulses in lightning electromagnetic radiation: observations and implications for lightning test standards. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, **38** (2), 156–164, 1996. URL <http://www.lightning.ece.ufl.edu/PDF/rakovetal1996.pdf>. 6
- [9] Rakov, V. A., Uman, M. A. Lightning: physics and effects. Cambridge University Press, 2007. URL <http://books.google.com.ar/books?id=TuMa5lAa3RAC>. 6
- [10] Fukunishi, H., *et al.* Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere. *Geophysical Research Letters*, **23** (16), 2157–2160, 1996. URL <http://vlf.stanford.edu/sites/default/files/publications/450.pdf>. 6

- [11] Inan, U. S., *et al.* Rapid lateral expansion of optical luminosity in lightning-induced ionospheric flashes referred to as elves. *Geophysical Research Letters*, **24** (5), 583–586, 1997. URL <http://vlf.stanford.edu/sites/default/files/publications/446.pdf>. 7
- [12] Chilingarian, A., Hovsepyan, G., Hovhannisyan, A. Particle bursts from thunderclouds: Natural particle accelerators above our heads. *Physical Review D*, **83**, 062001, 2011. URL [http://fzk.aragats.am/files/Publication/Particle\\_bursts\\_from\\_thunderclouds\\_Natural\\_particle\\_accelerators\\_above\\_our\\_heads.pdf](http://fzk.aragats.am/files/Publication/Particle_bursts_from_thunderclouds_Natural_particle_accelerators_above_our_heads.pdf). 7
- [13] Gurevich, A. V., Zybin, K. P. Runaway breakdown and electric discharges in thunderstorms. *Physics-Uspekhi*, **44** (11), 1119, 2001. URL [http://www.turpion.org/php/paper.phtml?journal\\_id=pu&paper\\_id=939](http://www.turpion.org/php/paper.phtml?journal_id=pu&paper_id=939). 7
- [14] Gurevich, A., Milikh, G., Roussel-Dupre, R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. *Physics Letters A*, **165** (5-6), 463 – 468, 1992. URL [http://www.ees.lanl.gov/ees2/pdfs/Gurevich\\_RRD\\_1992.pdf](http://www.ees.lanl.gov/ees2/pdfs/Gurevich_RRD_1992.pdf). 7
- [15] Chilingarian, A., *et al.* Ground-based observations of thunderstorm-correlated fluxes of high-energy electrons, gamma rays, and neutrons. *Physical Review D*, **82**, 043009, 2010. URL [http://fzk.aragats.am/files/Publication/2010/Thunder\\_final.pdf](http://fzk.aragats.am/files/Publication/2010/Thunder_final.pdf). 7
- [16] Cohen, M. B., *et al.* A lightning discharge producing a beam of relativistic electrons into space. *Geophysical Research Letters*, **37** (18), 2010. URL <http://vlf.stanford.edu/sites/default/files/publications/2010-22.pdf>. 7
- [17] Fishman, G. J., *et al.* Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin. *Science*, **264** (5163), 1313–1316, 1994. URL [http://nova.stanford.edu/~vlf/IHY\\_Test/Tutorials/TGFs/Papers/Fishman1994.pdf](http://nova.stanford.edu/~vlf/IHY_Test/Tutorials/TGFs/Papers/Fishman1994.pdf). 7
- [18] Smith, D. M., *et al.* Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV. *Science*, **307** (5712), 1085–1088, 2005. URL [http://nova.stanford.edu/~vlf/IHY\\_Test/Tutorials/TGFs/Papers/Smith2005.pdf](http://nova.stanford.edu/~vlf/IHY_Test/Tutorials/TGFs/Papers/Smith2005.pdf). 7
- [19] National Institute of Standards and Technology. ESTAR: stopping-power and range tables for electrons. URL <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>. 21
- [20] National Institute of Standards and Technology. XCOM: photon cross sections database. URL <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>. 21

- 
- [21] WWLLN, World Wide Lightning Location Network. URL <http://wlln.net/>. 24
- [22] Rudlosky, S. D., Shea, D. T. Evaluating WWLLN performance relative to TRMM/LIS. *Geophysical Research Letters*, **40** (10), 2344–2348, 2013. URL <http://wlln.net/publications/rudlosky.2013.grl50428.pdf>. 24
- [23] Abarca, S. F., Corbosiero, K. L., Galarneau, T. J. An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **115** (D18), 2010. URL <http://wlln.net/publications/sergio.JGR2010.2009JD013411.pdf>. 24





# Agradecimientos

Hay mucha gente a la que me gustaría agradecer por haber aportado su parte a esta tesis. En primer lugar, a mis padres por su apoyo continuo en mis proyectos. Con su amor y sus sacrificios me han permitido desde chico poder dedicarme a lo que me gusta y ahora no me alcanzan las palabras para demostrarles mi agradecimiento. Junto con ellos, mi hermana y mi abuela me han dado aliento constantemente y por eso también les agradezco a ellas.

Estudiar física no es algo que los niños suelen elegir de pequeños. En mi caso fue fundamental la pasión que demostraron mis profesores en el Politécnico para decidirme por esta carrera. Entre ellos, me gustaría agradecerle especialmente a Juan Farina por haberme acompañado al mundo de la física a través de las olimpiadas. Y no sería un “físico” sin las enseñanzas de mis directores de estos últimos dos años. Por ello me gustaría agradecerles a Hernán, Mariano y Xavier por haberme enseñado a ser un investigador, y a realizar cualquier análisis sin ver las X.

Ir a la facultad aportó no sólo física a mi vida, sino también amistades que fueron compañía en el estudio y formadores de ideologías con sus críticas y debates. Por eso quiero agradecerle a ellos, con quienes aún hoy en día me sigo reuniendo.

Al mudarme a Bariloche tuve la suerte de seguir conociendo gente maravillosa que a pesar de no estudiar mi misma carrera, fueron compañeros a diario. Por eso mi agradecimiento sigue para Juan, Tacca, el Jebi, Gastón, Nacho y nuestro lugar de inspiración para debatir y planear cómo salvar al mundo, Konna.

Por último, me gustaría agradecerle a mi novia Marisel. Sin su apoyo constante y su ayuda, no hubiera querido terminar esta carrera en Bariloche.

Todo esto no hubiera sido económicamente posible sin la asistencia de la Fundación del Nuevo Banco de Santa Fe y la Comisión Nacional de Energía Atómica, dos instituciones que con sus becas permitieron que me reciba en el tiempo mínimo establecido. En un mundo en el que la regla es pagar para estudiar, tengo la suerte de vivir en un país en donde la educación pública es gratuita y de excelencia. Sin embargo no pagar no es suficiente para poder hacerlo y el hecho de que instituciones decidan invertir en becas para estudiantes es admirable y me alienta a retribuirle al país con mi trabajo más que lo que ellos invirtieron en mí.

